

М.А.Музылёва, А.Б.Полонский, С.В.Станичный

*Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь***АПВЕЛЛИНГ И ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ
КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРОФИЛЛА-А В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ
ЧЕРНОГО МОРЯ И У ПОБЕРЕЖЬЯ КРЫМА**

На основе данных спутниковых наблюдений за температурой поверхности Черного моря и концентрацией хлорофилла-А за период с мая по октябрь 2005 – 2008 гг. рассматривается пространственно-временная изменчивость концентрации хлорофилла-А в зонах апвеллинга. Выявлено, что при развитии апвеллинга в северо-западной части моря минимальное значение концентрации хлорофилла-А наблюдается примерно за сутки до максимального понижения температуры. У побережья Крыма, наоборот, максимальное понижение температуры опережает экстремальное падение концентрации хлорофилла-А. Это объясняется особенностями вертикального распределения хлорофилла. В северо-западной части Черного моря присутствует подповерхностный минимум концентрации хлорофилла-А, отсутствующий у побережья Крыма и в глубоководной части моря.

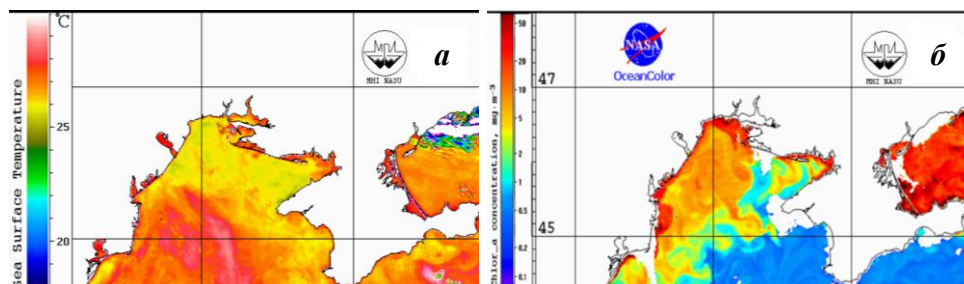
КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *прибрежный апвеллинг, хлорофилл-А, северо-западная часть Черного моря.*

Известно, что наиболее интенсивный апвеллинг наблюдается в прибрежных районах океанов и морей, в том числе и в Черном море. Прибрежный апвеллинг в Черном море особенно хорошо выражен в летний период в поле температуры поверхности. Зона температурного фронта, отделяющего холодные воды апвеллинга от более теплых прогретых вод, характеризуется повышенным содержанием биогенных элементов, что создает благоприятные условия для развития фито и зоопланктона. Вследствие этого в области прибрежного апвеллинга концентрируются рыбные скопления промысловых масштабов. Понижения температуры поверхности моря (ТПМ), вызванные апвеллингом, регулярно наблюдаются в летний период и у побережья Крыма, и в северо-западной части Черного моря [1 – 3].

За более чем 100 летнюю историю изучения апвеллинга в этом регионе были выявлены зоны наиболее частого его возникновения, районы с максимальной интенсивностью выхолаживания поверхностных вод, локальные особенности пространственно-временной изменчивости апвеллинга и т.п. [1 – 10]. Безусловно, такой интерес вызван интенсивным хозяйственным природопользованием в регионе. В этой связи особо следует выделить северо-западную часть Черного моря, где прибрежный апвеллинг наблюдается особенно часто.

Необходимо отметить, что пространственно-временная изменчивость термохалинной структуры и биопродуктивности вод северо-западной части Черного моря характеризуется рядом специфических особенностей. Это обусловлено, в первую очередь, значительным пресным стоком из-за впадения сюда таких крупных рек, как Дунай, Днепр, Днестр и Южный Буг. Именно обильный речной сток приводит к повышенной биопродуктивности и резкой вертикальной стратификации вод региона, что и является одной

© М.А.Музылёва, А.Б.Полонский, С.В.Станичный, 2010



Р и с . 1 . Пространственная изменчивость ТПМ (а) и концентраций хлорофилла-А (б) 14 июля 2006 г.

из главных причин гипоксических явлений и отличает северо-западную часть моря от прибрежных акваторий у п-ва Крым [4, 8, 10, 11 – 14]. Практически на любом пространственном распределении концентрации хлорофилла-А на поверхности Черного моря видно, что повышенная биопродуктивность приурочена к приустьевым акваториям даже при отсутствии ветрового апвеллинга (см., для примера, рис.1). Возникновение же регулярно повторяющегося сгона существенно усложняет пространственно-временную изменчивость хлорофилла-А.

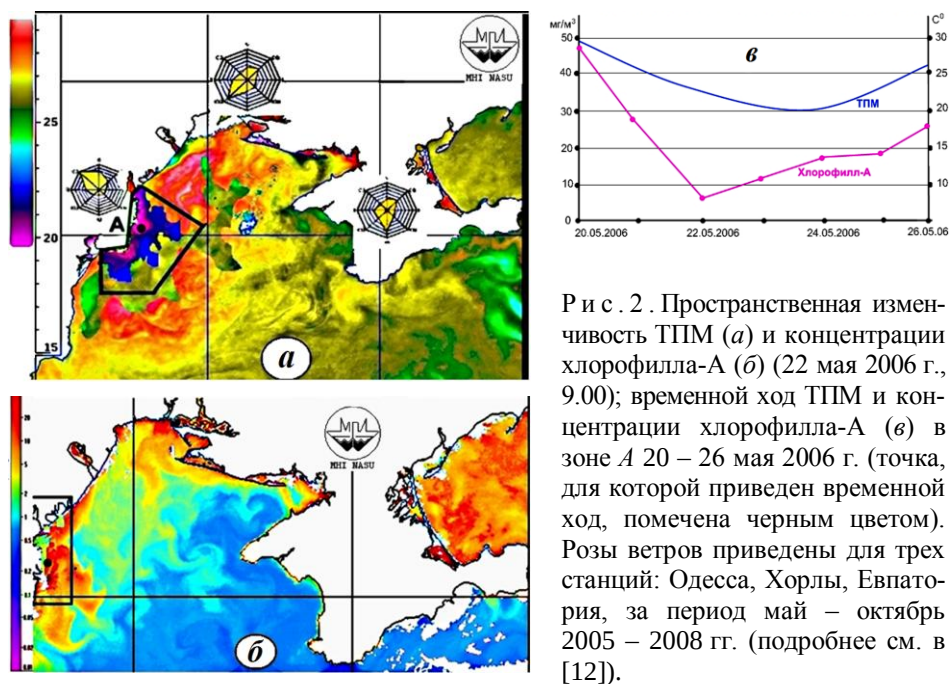
Настоящая работа является продолжением исследований апвеллинга в северо-западной части Черного моря и у побережья Крыма. В [11 – 13] были рассмотрены и проанализированы особенности пространственно-временной изменчивости ТПМ в зонах апвеллинга в теплый период года (май – октябрь 2005 – 2008 гг.). На основе анализа данных спутниковых наблюдений были выявлены зоны наиболее частого проявления апвеллинга в поле ТПМ. В настоящей работе рассматривается пространственно-временное распределение концентрации хлорофилла-А в период развития апвеллинга (которые приурочены к выделенным ранее зонам).

Характеристика использованных материалов и методика обработки. Для определения концентраций хлорофилла-А в период апвеллинга использовались спутниковые данные за период 2005 – 2008 г. (май – октябрь). Они были получены с помощью сканирующих спектрорадиометров MODIS (измерения с частотой 1 раз в сутки, разрешение 1 км).

Для анализа изменчивости ТПМ в работе использовались данные спутников NOAA-15/17 (измерения с частотой 3 раза в сутки, разрешение 1 км).

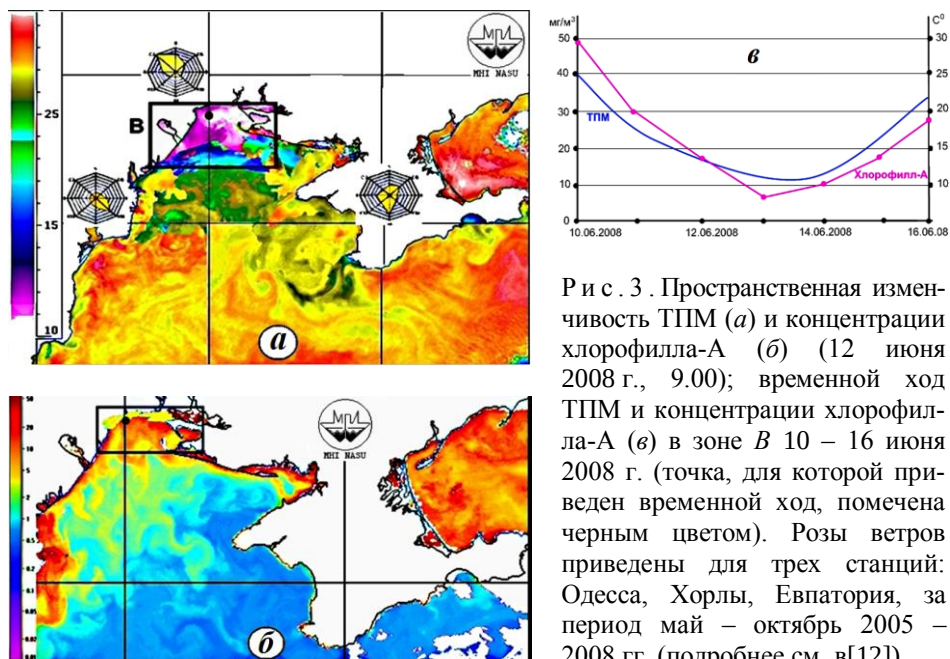
В работе использовалась следующая методика. Для периода развития апвеллинга в различных структурных зонах, которые были выделены в работах [11 – 13], отбирались спутниковые снимки с пересчитанной концентрацией хлорофилла-А в поверхностном слое (в мг/м^3). Затем для каждой отдельной зоны для периода развития апвеллинга строился временной ход ТПМ и концентрации хлорофилла-А, после чего анализировалось запаздывание между экстремумами этих характеристик с учетом особенностей вертикального распределения хлорофилла-А

Результаты и их анализ. Спутниковые снимки, характеризующие пространственно-временную изменчивость ТПМ, приведены в те сроки наблюдения, которым соответствуют моменты наибольшего развития апвеллинга в зонах А (рис.2, а), В (рис.3, а), С (рис.4, а), D (рис.5, а), E (рис.6, а), F (рис.7, а)

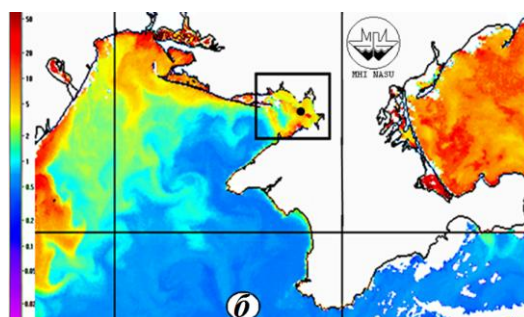
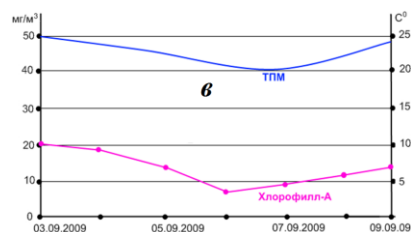
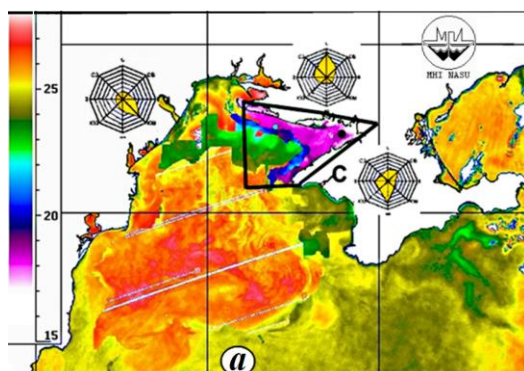


Р и с . 2 . Пространственная изменчивость ТПМ (а) и концентрации хлорофилла-А (б) (22 мая 2006 г., 9.00); временной ход ТПМ и концентрации хлорофилла-А (в) в зоне А 20 – 26 мая 2006 г. (точка, для которой приведен временной ход, помечена черным цветом). Розы ветров приведены для трех станций: Одесса, Хорлы, Евпатория, за период май – октябрь 2005 – 2008 гг. (подробнее см. в [12]).

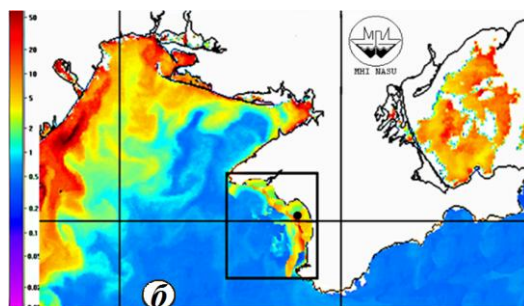
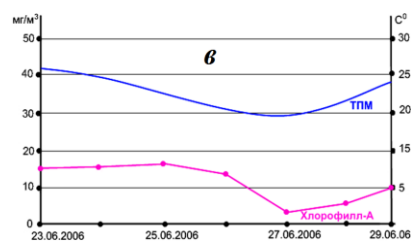
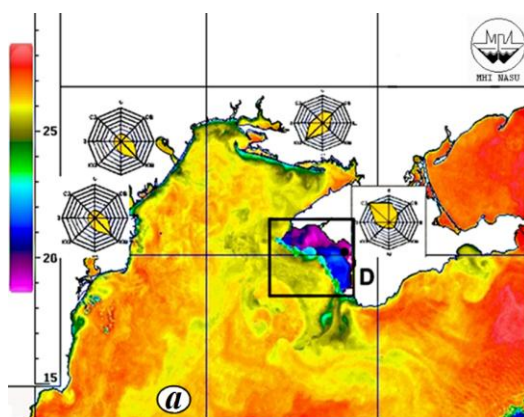
и G (рис.8, а). Для тех же самых сроков на рис.2, б – 8, б представлено и пространственное распределение хлорофилла-А. Видно, что аномалии ТПМ выражены гораздо ярче, чем аномалии концентраций хлорофилла-А. Отметим, что в период апвеллинга понижение температуры в прибрежной зоне северо-западной части Черного моря сопровождается понижением концентрации хлорофилла-А (рис.2, 3). Это обусловлено тем обстоятельством, что



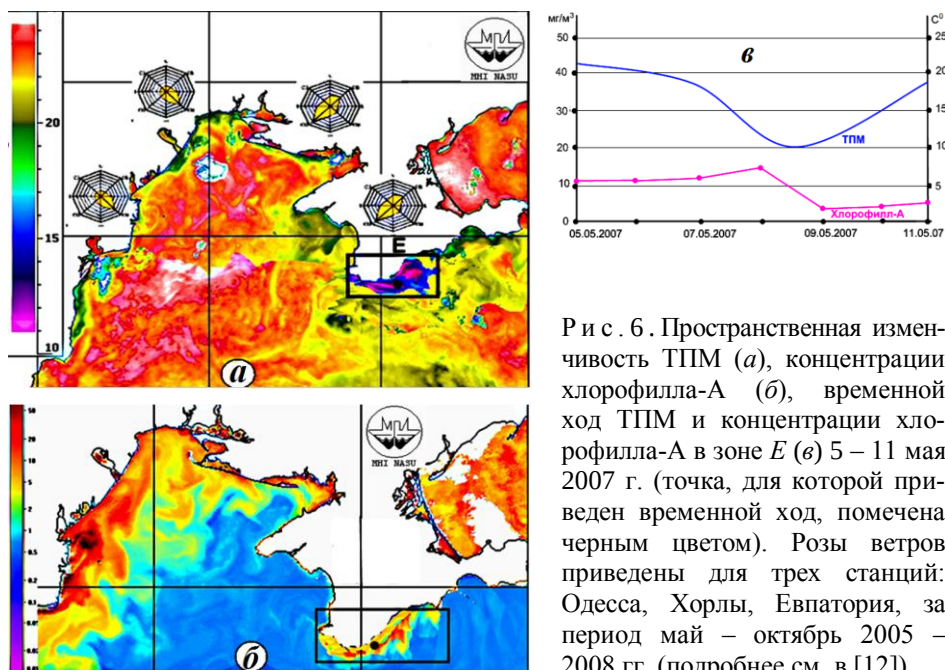
Р и с . 3 . Пространственная изменчивость ТПМ (а) и концентрации хлорофилла-А (б) (12 июня 2008 г., 9.00); временной ход ТПМ и концентрации хлорофилла-А (в) в зоне В 10 – 16 июня 2008 г. (точка, для которой приведен временной ход, помечена черным цветом). Розы ветров приведены для трех станций: Одесса, Хорлы, Евпатория, за период май – октябрь 2005 – 2008 гг. (подробнее см. в [12]).



Р и с . 4 . Пространственная изменчивость ТПМ (а), концентрации хлорофилла-А (б); временной ход ТПМ и концентрации хлорофилла-А в зоне С (в) 3 – 9 сентября 2009 г. (точка, для которой приведен временной ход, помечена черным цветом). Розы ветров приведены для трех станций: Одесса, Хорлы, Евпатория, за период май – октябрь 2005 – 2008 гг. (подробнее см. в [12]).



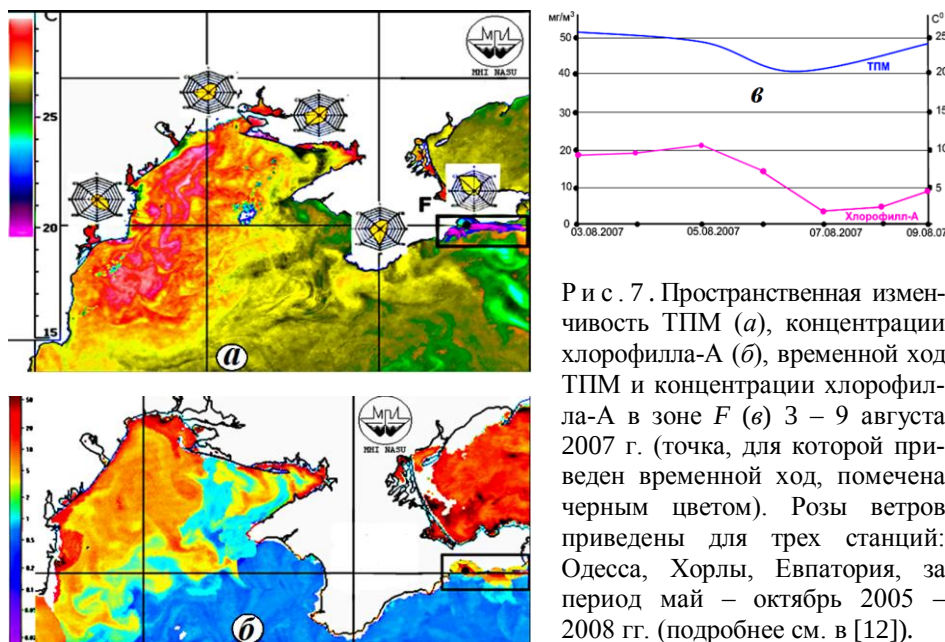
Р и с . 5 . Пространственная изменчивость ТПМ (а), концентраций хлорофилла-А (б), временной ход ТПМ и концентрации хлорофилла-А в зоне D (в) 23 – 29 июня 2006 г. (точка, для которой приведен временной ход, помечена черным цветом). Розы ветров приведены для трех станций: Одесса, Хорлы, Евпатория, за период май – октябрь 2005 – 2008 гг. (подробнее см. в [12]).



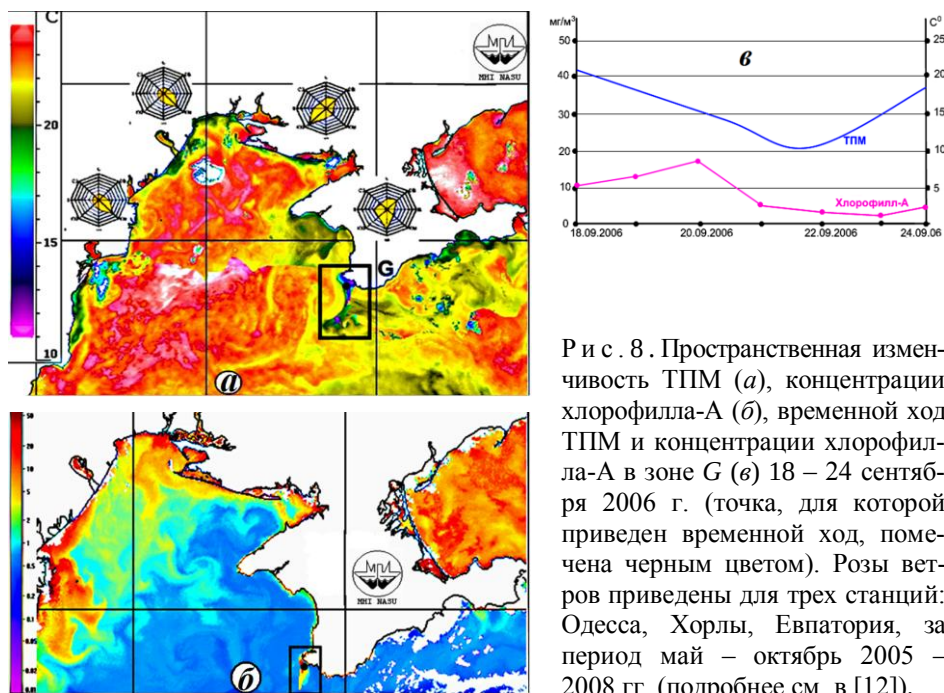
Р и с . 6 . Пространственная изменчивость ТПМ (а), концентрации хлорофилла-А (б), временной ход ТПМ и концентрации хлорофилла-А в зоне Е (в) 5 – 11 мая 2007 г. (точка, для которой приведен временной ход, помечена черным цветом). Розы ветров приведены для трех станций: Одесса, Хорлы, Евпатория, за период май – октябрь 2005 – 2008 гг. (подробнее см. в [12]).

в период сгона в прибрежной зоне моря происходит подъем термоклина к поверхности моря. При этом в поверхностный фотический слой (занятый водами речного происхождения с высоким уровнем концентрации хлорофилла-А) поступают холодные, обедненные хлорофиллом и относительно прозрачные воды.

В северо-западной части Черного моря понижение концентрации хлорофилла проявляется в подповерхностном слое уже в начальной стадии раз-



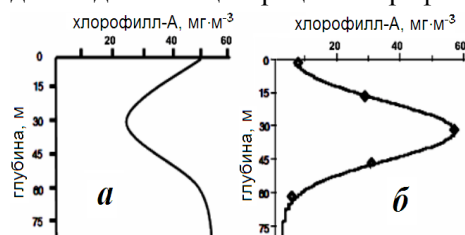
Р и с . 7 . Пространственная изменчивость ТПМ (а), концентрации хлорофилла-А (б), временной ход ТПМ и концентрации хлорофилла-А в зоне F (в) 3 – 9 августа 2007 г. (точка, для которой приведен временной ход, помечена черным цветом). Розы ветров приведены для трех станций: Одесса, Хорлы, Евпатория, за период май – октябрь 2005 – 2008 гг. (подробнее см. в [12]).



Р и с . 8 . Пространственная изменчивость ТПМ (а), концентрации хлорофилла-А (б), временной ход ТПМ и концентрации хлорофилла-А в зоне G (в) 18 – 24 сентября 2006 г. (точка, для которой приведен временной ход, помечена черным цветом). Розы ветров приведены для трех станций: Одесса, Хорлы, Евпатория, за период май – октябрь 2005 – 2008 гг. (подробнее см. в [12]).

вития апвеллинга. К примеру, понижение ТПМ 20 – 23 мая 2006 г. с 30 до 20 °C вызвало появление на поверхности вод с концентрациями хлорофилла-А до 6 мг/м³ (при начальной концентрации 48 мг/м³). На рис.2, а видно, что уменьшение концентрации хлорофилла опережает падение ТПМ примерно на сутки. Аналогичное запаздывание во временном ходе ТПМ относительно концентрации хлорофилла-А отмечается и в зонах В и С (рис.3, в; 4, в).

Полученный результат объясняется особенностями вертикального распределения хлорофилла в Черном море, а именно наличием подповерхностного минимума в северо-западной части моря, который отсутствует в глубоководной части Черного моря и у побережья Крыма (сравни рис.9, а и б). Северо-западная часть Черного моря вообще отличается повышенной концентрацией хлорофилла-А в поверхностном слое. На поверхности значение концентрации хлорофилла-А ~ 50 мг/м³ является типичным для приустьевых участков этой части акватории. Это объясняется впадением сюда большого объема речных вод, что вызывает увеличение эвтрофикации и концентрации хлорофилла-А в поверхностном слое. В результате в приустьевых зонах концентрация хлорофилла-А достигает (или даже превышает) 50 мг/м³. При этом в нескольких десятках км мористее она падает на 2 порядка. Но даже здесь концентрация хлорофилла-А на поверхности выше, чем у побережья Крыма более чем в 2 раза. Однако уже на глубине ~ 20 м из-за уменьшения количества солнечной инсоляции



Р и с . 9 . Вертикальное распределение хлорофилла в северо-западной части (а) [7] и глубоководной части (б) [6] Черного моря.

и речной воды концентрация хлорофилла-А в приустьевых участках северо-западной части Черного моря заметно снижается. На вертикальном профиле распределения хлорофилла-А это уменьшение концентрации формирует подповерхностный минимум. Акватории в открытой части Черного моря и у побережья Крыма, напротив, отличаются намного более низкими концентрациями хлорофилла-А на поверхности и наличием подповерхностного максимума (рис.9, б). Малая эфтрофированность поверхностных вод моря здесь объясняется отсутствием впадающих рек, а подповерхностный максимум концентрации хлорофилла-А образуется из-за высокого содержания кислорода и органических веществ, концентрирующихся вблизи верхней части термоклина [14 – 17]. Поэтому в зонах апвеллинга, расположенных у юго-западного, южного и юго-восточного побережья Крыма, сначала наблюдается минимум ТПМ, затем, с запаздыванием (через 0,5 – 1 сут), на поверхности проявляется минимум концентраций хлорофилла-А (рис.5, в – 8, в).

Следует заметить, что приведенный на рис.9, б профиль вертикального распределения хлорофилла-А в глубоководной части Черного моря показывает большие вертикальные градиенты его концентрации (более 1 мг/м³/м). У побережья Крыма в поверхностном слое вертикальные градиенты хлорофилла-А на порядок меньше [16, 17]. Поэтому повышение концентрации хлорофилла-А в поверхностном слое здесь на начальной стадии развития апвеллинга относительно невелико (сравни рис.2, в – 3, в и 5, в – 8, в).

Выводы. Пространственно-временная изменчивость концентрации хлорофилла-А в период развития апвеллинга в северо-западной части Черного моря и у побережья Крыма отличаются. У юго-западного, южного и юго-восточного побережья Крыма сначала наблюдается минимум ТПМ, а затем (приблизительно через 1 сут) на поверхности проявляется минимум концентраций хлорофилла-А. В северо-западной части Черного моря, наоборот, во временном ходе минимум ТПМ запаздывает по сравнению с минимумом концентрации хлорофилла-А. Это объясняется наличием подповерхностного минимума в вертикальном распределении хлорофилла северо-западной части Черного моря, отсутствующего в открытой части моря и у побережья Крыма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блатов А.С., Иванов В.А. Гидрология и гидродинамика шельфовой зоны Черного моря. – Киев: Наукова думка, 1992. – С.26-35.
2. Гаркавая Г.П., Богатова Ю.И., Берлинский Н.А., Гончаров А.Ю. Районирование Украинского сектора северо-западной части Черного моря (по гидрофизическим и гидрохимическим характеристикам) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2000. – С.9-24.
3. Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Т.4. Черное море. – Л: Гидрометеиздат, 1986. – 99 с.
4. Орлова И.Г., Белевич Р.Р., Попов Ю.И. и др. Динамика гипоксических процессов в придонных водах северо-западного шельфа Черного моря // Океанология. – 1999. – 39, № 4. – С.548-554.
5. Селин П.Ю. Гидрохимические особенности гипоксично-аноксичных зон на северо-западном шельфе Черного моря. – Деп. ВИНТИ № 298-В88. – М.: ГОИН, 1988. – 34 с.

6. Yunev O.A., Moncheva S., Car Stensen J. Long-term variability of vertical chlorophyll a and nitrate profiles in the open Black Sea: eutrophication and climate change // Mar. Ecol. Prog. Ser.– 2005.– 294.– P.95-107.
7. Финенко З.З. Первичная продукция в летний период / Динамика вод и продуктивность планктона Черного моря.– М.: ИО АН СССР; КОЦ «Мировой океан», 1988.– С.315-322.
8. Толмазин Д.М. Гидролого-гидрохимическая структура вод в районах гипоксии и заморов северо-западной части Черного моря // Биология моря.– 1977.– 43.– С.12.
9. Украинский В.В., Попов Ю.И., Орлова И.Г. и др. Изменчивость кислородного режима и гидрологической структуры вод северо-западного шельфа Черного моря в летне-осенний период 1998 года // Метеорологія, кліматологія та гідрологія.– 2001.– вып.43.– С.211-221.
10. Фацук Д.Я., Самышев Э.З., Себах Л.К., Шляхов В.А. Формы антропогенного воздействия на экосистему Черного моря и ее состояние в современных условиях // Экология моря.– 1991.– вып.38.– С.19-27.
11. Фесюнов О.Е., Назаренко М.Ф. Геоморфологические и экологические особенности гипоксии северо-западного шельфа Черного моря // Экология моря.– 1991.– вып.37.– С.45-52.
12. Михайлова Э.Н., Музылёва М.А., Полонский А.Б., Соловьев Д.М., Станичный С.В. Пространственно-временная изменчивость характеристик апвеллинга в северо-западной части Черного моря и у побережья Крыма в 2005 – 2008 гг. // Системы контроля окружающей среды.– Севастополь, 2010.– С.68-73.
13. Михайлова Э.Н., Музылёва М.А., Полонский А.Б. Пространственно-временная изменчивость характеристик апвеллинга в северо-западной части Черного моря и у побережья Крыма в 2005 – 2008 гг. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009.– вып.19.– С.134-150.
14. Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Соловьев Д.М., Станичный С.В. Циклонические вихри апвеллингового происхождения у юго-западной оконечности Крыма // Исследование Земли из космоса.– 1998.– № 3.– С.83-88.
15. Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Соловьев Д.М., Станичный С.В. Прибрежный апвеллинг в северо-западной части Черного моря // Исследование Земли из космоса.– 1997.– № 6.– С.61-72.
16. Отчет о научно-исследовательской работе комплексные гидрофизические и гидрохимические исследования морской среды с целью устойчивого, экологически и техногенно безопасного использования ее ресурсного потенциала («Океанография»).– Морской гидрофизический институт НАНУ, 2009.– 345 с.
17. Отчет начальника отряда океанографии о работах в экспедиции 64-го рейса НИС «Профессор Водяницкий» 30.06 – 06.07 2010 г.– Морской гидрофизический институт НАНУ, 2010.– 75 с.
18. Музылева М.А., Полонский А.Б. Ветровые условия возникновения апвеллинга в северо-западной части Черного моря и у ЮБК // Системы контроля окружающей среды. Средства и мониторинг.– Севастополь, 2008.– С.67-71.
19. Музылева М.А., Полонский А.Б. Характеристика межгодовой изменчивости ветрового режима и апвеллинга в Одесском заливе// Системы контроля окружающей среды. Средства и мониторинг.– Севастополь, 2009.– С.56-58.

Материал поступил в редакцию 25.11.2010 г.